

## 第4章 卓上実験を併用した材料力学教育の試み

辻 知章（静岡大）

### 1. はじめに

著者らは、材料力学の講義を分かりやすく学生に教えるシステムの構築を目指し、マルチメディアを用いて様々な試みを行って来ている<sup>(1)(2)</sup>。以下にわれわれが行った来たことを年代順に列挙する。

- 1992 → 修論、卒研発表をマルチメディアで行う
- 1992 → 材料力学の電子ブックの開発
- 1994 → 講義にマルチメディアを使う
- 1994 → マルチメディアプロジェクト
- 1995 → インターネットを用いた遠隔講義
- 1997 → VRMLを用いたバーチャル実験
- 1998 → VODによる講義
- 1998 → 講義で実際の実験が出来ないか？

様々な試みにもかかわらず、年々材料力学に関する知識の低下が起こっている。図1は、材料力学Ⅲの成績（優、良、可、不可）の割合の年変化を示してある。この図を見ると1997年からの成績の低下が著しく、2000年度にはほとんど合格者が出ないと予想される。今までの所、この予想は適中しそうな勢いである。このような状況を踏まえて、講義を通して学生に接していると、“考えることを嫌う”、“集中出来ない”、“現実感覚が無い”、“理論的思考の低下”、“応用力の低下”等の問題が最近顕著になってきている。これらの原因の多くは、小、中、高校までの教育で、実際に物を作る時間が毎年のように減少していることにあるのではないかと

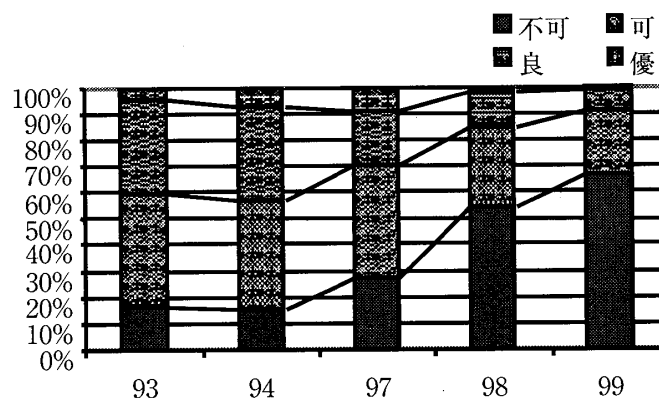


図1 材料力学Ⅲの成績の変化

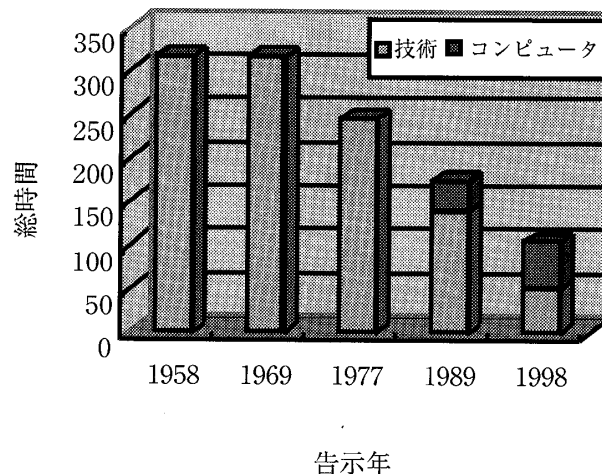


図2 中学教育における技術の総時間の変化

我々は考えている。物作りの過程において、失敗を重ねることにより、様々な事を考え、創意工夫をすることにより養われる、思考、想像力、応用力といったものが年々失われているのである。これに追い討ちをかけるように、新指導要項では、中学の技術家庭の半分の時間が情報教育に割り当てられることになり、単純に考えると、図2に示すように、技術を男性、家庭を女性が学習していた時代に比べ、技術の時間は1/4になってしまうのである<sup>(3)</sup>。そこで、少しでも学生に自ら思考させるために、学生参加型の講義、物作りに関する講義等が色々試みられて来ている。東京大学や東京工業大学等の、教官人員に余裕ある大学では、大幅なカリキュラム改革を行い、講義と実験、実習がシンクロした、いわゆる PBL (Problem Based Learning) 形式の講義体系への移行を目指している。しかし、これらの講義は、準備等を考えるとかなり大掛かりなものにならざるおえず、現状の日本の大学の教育事情からするとなかなか実行するのは難しい。そこで我々は、バーチャルリアリティを用いて引張試験器や曲げ試験器を作り、様々な実験を通して、材料力学の理論を学生に発見させる教育システムの構築を試みて来ている<sup>(2)(4)</sup>。しかし、テレビゲームや様々なメディアに慣れ親しんで来ている現在の学生に興味を持たれるコンテンツを作成することは、現状では不可能である。さらに、現実、すなわち自然は、仮想現実には比べようもなく複雑で多様であり、自然のもつ多様性を全てコンピューター内で再現することは絶対に出来ない。そこで本論文では、材料力学の講義の枠内で、学生参加型の講義として、学生に物を作らせ、自ら実験し、理論を発見することを目指して、幾つかの卓上実験を提案し、実際の講義で試行した結果を報告する。また、最後に、大福帳による講義の改善についても感想を述べる。

## 2. 机上で出来る材料力学実験

**2.1 コンセプト** 今回実施した簡易実験は、すでに用意され設定された実験器具を使用し、詳細なスケジュールが規定された従来の学生実験とは異なり、「道具」のみを与え、誘導尋問的な余計な説明は極力せず、実験方法などは各自で考えて行わせる。あえて最終ゴールを定めず、自分なりの結果・理論を得ることを重視する。また、実験装置や材料は、各学生が家でも行えるように、大学生協等で簡単に入手できるものを利用し、試験片等も極力学生が自作する

ことを目指す。実験に要する時間は、1講義内（90分）で終わり、かつ総評などの時間を残すために60分以内で終了することを目標とする。

**2.2 机上実験** 以下に示す(1)～(4)の実験を考案した。表1に、使用した試験材料を示す。(1)の実験では、表1に示す中から、学生に自由に材料を選択させたが、実験(2)～(4)では、それに固く、かつ、ある程度強度があった、スパゲッティを用いた。表2に、各実験に要した時間、構成グループの人数、用いた道具を示す。

表1 試験材料の機械的性質

| 材料      | 長さ [mm] | 直径 [mm]       | 断面形状 |
|---------|---------|---------------|------|
| シャーペンの芯 | 61      | 0.3, 0.5, 0.9 | 円    |
| そば      | 194     | 1.3 x 1.3     | 四角   |
| そうめん    | 241     | 1.25          | 円    |
| スパゲッティ  | 149     | 1.5           | 円    |

表2 実験の詳細

| #   | 題目         | 経過時間[min] | 1グループの人数 | 工具           |
|-----|------------|-----------|----------|--------------|
| (1) | 引張試験       | 40        | 3        | ばねばかり→ペットボトル |
| (2) | はりのコンテスト   | 60        | 3        | テープ、定規       |
| (3) | はりの曲げ試験    | 40        | 2        | 五円玉、定規       |
| (4) | 塔を立てるコンテスト | 20        | 3 or 4   | テープ          |

(共通な工具：はさみ、カッター)

### (1) 簡易引張試験 (図3)

表1に示す材料を、引張り破壊させる実験を行った。とにかく、ばね計りで引張らせて、最大の荷重がかけられたチームが優勝とした。全ての材料とも、曲げを受けると簡単に折れるてしまうが、うまく引張ることが出来ればかなりの荷重まで持つ。ポイントは、軸に沿って荷重をかけられるようなフックを材料に取り付けられるかどうかである。手先の器用さと根気がかなり要求される。次年度の実験では、ばね計りの代わりに、水の入ったペットボトルを数本用意し、これをつるすことにより引張るように改良した。

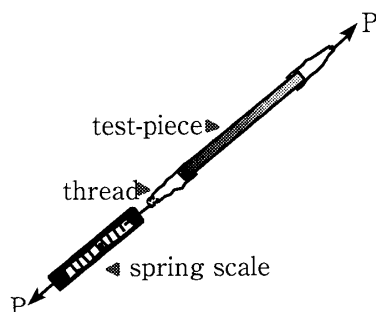


図3 引張試験

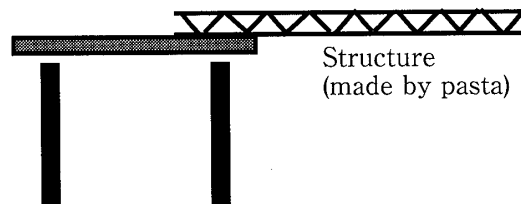


図4 はりのコンテスト

## (2) はりをどこまで延ばせるかのコンテスト (図4)

机の上に端を固定したはりを、床につかずに延ばせた距離を競う。以下に示す競技規定に基づいて、グループ毎のコンテスト形式で行った。

1. こちらで準備した材料以外使用しないこと
2. 壊れたり、構造物の先端が床についたら無効とする
3. 時間内であれば何度でも挑戦可能とする
4. 部材は曲げても、折ってもかまわない
5. 各班最低一度は測定すること
6. 接合部以外をテープで補強しないこと
7. 長さの測定は、たわみ量に関わらず根元からの水平距離を測定すること

ただ材料を束ねただけでは、自重で曲がり、直ぐ床についてしまう。材料を適当な長さに折り、トラス構造に組み直す工夫をすると、かなり遠くまで延ばすことが可能である。

## (3) はりのたわみの実験 (図5)

各グループで支持条件を設定し、はりのたわみのグラフを作成する。正確なグラフは無理であるが、荷重とたわみの比例関係程度に気が付けてくれることを期待した。

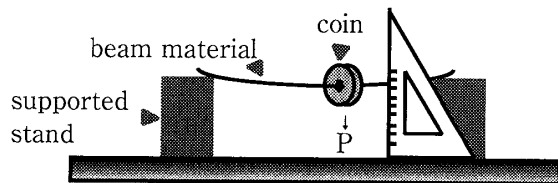


図5 はりの曲げ試験

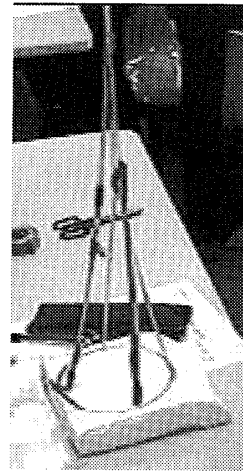


図6 塔を立てるコンテスト

## (4) どこまで高い塔を作れるかコンテスト (図6)

机の上に置いた発泡スチロールの土俵から、何処まで高く塔を立てられるかのコンテストを以下の競技規定で行う。

1. 配られた材料と道具以外は使用しないこと
2. 材料は折って使っても曲げて使ってもよいものとする
3. 指定時間内で行うこと (20分)

4. 塔の根本が土俵（直径12cmの円）からはみ出さないこと。ただし、土台から離れた部分（空中）ははみ出してもよいものとする
5. 測定は作った建物から手を離して安定した状態で行い、測定時に破壊したものは無効とする
6. 時間内であれば何度測定してもかまわない
7. 高さは建物の向きや曲がりに関係なく土台から先端までの垂直距離を測定する

### 3. 実施および結果

**3.1 1999年度における実施対象と状況** 表3に、実施対象の講義や学年等の詳細を示す。

1999年度において、2節で示した実験(1)~(3)を、材料力学を初めて学ぶ化学工学コース4年生35名に対し、半期で開講している材料力学の講義中で行った。また、すでに材料力学を2年次に通年で学んだ機械工学の3年生42人と、夜間主コースの4年生15人に対して、実験(2)を実施した。さらに、高校への出張講義において、(4)の実験を行った。また、(2)の実験は、当工学部で毎年開催している、学部公開（テクノフェスタ浜松）において、一般の人に対しても行った。90分の講義に学生を連続して集中させることは、通常の講義では不可能であるが、多くの学生が意欲的に実験に取り組んでいた。以下、各実験の実施状況について述べる。

表3 卓上実験の実施対象

| 講義名等     | 学科等    | 学年   | 人数  | 実験種別          | 実施年度     |
|----------|--------|------|-----|---------------|----------|
| 材料力学     | 化学工学科  | 4    | 35  | (1), (2), (3) | 1999（前期） |
| 材料力学 III | 機械工学科  | 3    | 42  | (2)           | 1999（前期） |
| テクノフェスタ  | 一般市民   | -    | 200 | (2)           | 1999（後期） |
| 弾性学      | 機械工学科  | 4(夜) | 15  | (2)           | 1999（後期） |
| 出張講義     | 伊豆中央高校 | 2    | 80  | (4)           | 1999（後期） |
| 出張講義     | 横須賀高校  | 3    | 15  | (4)           | 1999（後期） |
| 材料力学     | 化学工学科  | 4    | 25  | (1), (2), (4) | 2000（前期） |
| 材料力学 III | 機械工学科  | 3    | 80  | (4)           | 2000（前期） |

実験(1)：断面積を求めて応力を求めるとか、応力ひずみ線図を描くということは、ほとんど不可能であった。とにかく引張って見て、かなりの荷重まで持つということは大旨理解されたようである。最後に、“なぜ曲げると簡単に折れるのに、引張るとこんなに強いのか？”については、材料力学をキチンと学習すると分るということにして終了した。

実験(2)：材料力学の基礎知識のない化学工学コースの学生は、スパゲッティを束ねたり、クレーンのような形状を創る等の工夫はあったが、トラス構造を作ったグループは見られなかった。一方、既に材料力学を学んでいる機械工学の学生は、1つのグループがトラス構造を作り、ある程度の成功を収めると、他のグループもトラス構造を作った。図7(a)と(b)に、講義と一般公開での作成風景を載せる。

実験(3)：はりの曲げ理論はまだ教えていないため。各グループ独自の固定の方法を試みてい



(a) 夜間主コース (基礎弾性学)



(b) テクノフェスタ浜松

図7 塔を立てるコンテスト

た。片持ち、両端支持はもちろんあったが。両端固定や、固定と支持を組み合わせたグループもあった。とにかく実験をやって発見したことをレポートにして提出させた。荷重とたわみの比例関係には多くのグループが気付いた。

実験(4)：この実験は、高校への出張講義において行った。最初、簡単に材料力学とはどのような学問であるかを説明(20分)し、残りの20分で実施した。進学校(80名)と、そうでない高校(10名)の2校で実施した。高校の教員もチームを作って参加していた。多少なりとも材料力学の実体験に貢献した。面白いことに、ペーパーテスト上の学力が劣る高校の方が、人数が少ないにもかかわらず、バラエティーに富んだ構造物を作成した。(図8)

実験終了後のアンケート結果から、簡易実験を面白いと感じた化学工学コースの学生は(1)、(2)では90%程度、(3)では55%と半数以上であった。機械工学コースではおよそ8割の学生が興味を示した。化学工学コースでは(1)、(2)、(3)の実験に対してそれぞれ、72%、81%、58%の学生が有益な実験であったと評価している。実験(3)に対する評価が(1)、(2)と比較して悪いのは、



(a) 伊豆中央高校



(b) 横須賀高校

図8 塔を立てるコンテスト

(1)、(2)の実験に比べ、(3)の実験はコンテスト性が薄く、また、測定とグラフ作成に多くの時間を要し、作業時間に比べデスクワークが多かったこと等が考えられる。これらの結果と実験中に学生同士で様々な意見が飛び交うなど、簡易実験を実施した時の学生の取り組む姿勢などから、両コース共に通常の講義と比べて学生の積極的な参加が得られ、学生自身で考え・行動するという当初のもくろみはかなりの部分で達成されたと考えられる。

**3.2 2000年度における実施対象と状況** 1999年度に実施した実績を基に、化学工学で始めて材料力学を学ぶ4年生を対象とし、表4に示す3回の卓上実験を講義内に取り入れた講義日程を立て、実験(1)、(3)、(4)を実施した。まず、2回目の講義において、日頃経験したことのな

表4 化学工学科「材料力学」の講義日程(2000年度)

| No. | 月/日   | コメント                                 |
|-----|-------|--------------------------------------|
| 1   | 04/12 | 講義1：ガイダンス＋簡単な材料力学の説明                 |
| 2   | 04/19 | 実験1 材料（シャーペンの芯など身近な材料）の引張りによる破壊試験(1) |
| 3   | 04/26 | 講義2：応力とひずみの講義（垂直応力・ひずみ、せん断応力・ひずみ）    |
| 4   | 05/10 | 講義3：引張と圧縮                            |
| 5   | 05/17 | 実験2 塔を立てる実験(4)                       |
| 6   | 05/24 | 中間試験1（講義1，2，3）                       |
| 7   | 05/31 | 中間試験解説1                              |
| 8   | 06/07 | 講義4：はりのせん断と曲げモーメント                   |
| 9   | 06/14 | 実験3 はりのたわみの実験(3)                     |
| 10  | 06/21 | 講義5：はりの応力講義、はりのたわみ                   |
| 11  | 06/28 | 中間試験2（講義4，5）                         |
| 12  | 07/05 | 中間試験解説2                              |
| 13  | 07/12 | 講義7：薄肉円筒と厚肉円筒                        |
| 14  | 07/19 | 最終試験1                                |
| 15  | 09/?? | 最終試験2                                |

い材料の破壊を体験させるために、実験(1)を実施した。そして、「何故簡単に折れてしまうシャーペンの芯やスパゲッティの麺が、引張には強いのか？」という問題を、実験を行ったグループ毎に討論し、発表を行った。学生が考えた解答に対して、合っているとか間違っているとかのコメントはせずに、「材料力学を学んで理解することにより、理論的解答は得られる。」ということで講義を締めくくった。以降、学生はこの問題を抱えたまま、材料力学の理論を学んで行くことになる。3、4回目は通常の講義を行った。講義は、『材料力学の電子本』<sup>(1)</sup>を利用して、まず各種理論に関するムービーを見せ、概略を掴ませた後に、ムービーをコマ送りにしながら、要所要所に説明を加えて行く形式で行っている。学生は、ムービーと私の生の説明と、2回同じ内容の説明を聞くことになる。希望者にはCDを配付してあり、家や研究室で飽きるまでムービーを見ることが出来る。理論的講義に飽きて来た5回目に、学習意欲を引き戻すことを狙って、塔を立てる実験(4)を実施した。構造物を構築するということは、材料力学の全ての知識を総動員することに通じる。しかし、この時点では利用出来る材料力学の知識が少なく、表5に示すアンケート結果からも分るように、“材料力学の知識が役に立ったか？”という問いに対して、否定的回答が80%以上であった。しかし、同じ実験を、既に1年間材料力

表5 塔をたてる実験アンケート結果（化学工学科2000.05.17）

| 質問       | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------|------|------|------|------|
| 有効回答数    | 23   | 23   | 24   | 24   |
| 回答 1 [%] | 0.0  | 0.0  | 25.0 | 25.0 |
| 回答 2 [%] | 8.7  | 0.0  | 50.0 | 58.3 |
| 回答 3 [%] | 39.1 | 34.8 | 20.8 | 16.7 |
| 回答 4 [%] | 52.2 | 65.2 | 4.2  | 0.0  |
| 平均点      | 3.4  | 3.7  | 2.0  | 1.9  |

表6 塔をたてる実験アンケート結果（機械工学科 2000.05.19）

| 質問       | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------|------|------|------|------|
| 有効回答数    | 116  | 116  | 115  | 114  |
| 回答 1 [%] | 2.6  | 0.0  | 33.9 | 26.3 |
| 回答 2 [%] | 3.4  | 0.9  | 33.9 | 51.8 |
| 回答 3 [%] | 54.3 | 26.7 | 27.8 | 19.3 |
| 回答 4 [%] | 39.7 | 72.4 | 4.3  | 2.6  |
| 平均点      | 3.3  | 3.7  | 2.0  | 2.0  |

学を学んだ機械工学科の3年生に行った結果（表6）と比較しても、ほぼ同様な回答分布となっている。座学で得られた知識のみでは、実際の現実に適用することは難しいのであろうか。実験終了後のコメントとして、関連する材料力学の理論分野の名称を上げて終了した。以降の2回は、中間試験とその回答を行った。次に、はりの曲げ理論の導入部分の講義を行った。理論を一通り教えてから、はりの曲げ実験(3)を行うことも考えたが、まず実際に体験させることを狙い、実験(3)を実施した。この実験は、1999年度のアンケートでは評判があまり良く無かった（約4割がつまらなかったと回答）。この反省を基に、学生に強制的に作業させるようなコメントは極力さけ、実験条件や何をどのように測定するかは、各グループ毎に自由に考えてもらい、「とにかく、はりの曲げに対して何かを発見して下さい。」ということをくり返しコメントした。最初、幾つかのグループは、何をやって良いのか戸惑い、「どういう条件を与えて、何を測定するのかキチンと教えて下さい。」と言って来たが、「何でも良いから、自分で考えてやって見て下さい。」と答えた。最初戸惑っていたグループも、回りのグループが何か始め出すと、要領が分かった来たようで、自分たちで条件や測定方法を考え始めた。表7に示すアンケートの結果を見ると、『この実験では、道具の使い方や実験手順は各自で自由に考えて行ってもらいましたが、それでよかったでしょうか？』の問いに対して、80%近くの学生が肯定的な回答をし、同様に80%近くが“実験をおもしろい”と感じてくれていた。当然のことであるが、ルールに乗った実験は、一方的な講義と同様、学生にとっては面白くないものである。裏を返せば、学生自らの発想が生かせる、自由度の大きい実験を構築することが、我々が目指す事であるということを再確認出来た。以後、講義、中間試験、回答、講義、最終試験と進み、講義を終了した。



表7 はりのたわみ実験アンケート結果（化学工学科 2000.06.14）

| 質問     | 1    | 2    | 3 | 4    | 5    |
|--------|------|------|---|------|------|
| 有効回答数  | 22   | 22   | - | 21   | 22   |
| 回答1[%] | 0.0  | 0.0  | - | 4.8  | 0.0  |
| 回答2[%] | 0.0  | 31.8 | - | 28.6 | 22.7 |
| 回答3[%] | 54.5 | 31.8 | - | 42.9 | 27.3 |
| 回答4[%] | 45.5 | 36.4 | - | 23.8 | 50.0 |
| 平均点    | 3.5  | 3.0  | - | 2.9  | 3.3  |

質問1：実験、あるいは工作は好きですか？

質問2：今回の実験はおもしろかったですか？

質問3：思い通りのものがつくれましたか？

質問4：作成にあたって材料力学の知識は役に立ちましたか？

質問5：この実験では、道具の使い方や実験手順は各自で自由に考えて行ってもらいましたが、それでよかったでしょうか？

回答1：あてはまらない

回答2：どちらかと言えばあてはまらない

回答3：どちらかと言えばあてはまる

回答4：あてはまる

#### 4. 大福帳

卓上実験とは別に、以下の夜間主コースの学生について、大福帳による講義の改善を試みた。

材料力学Ⅲ 3年 20人

基礎弾性学 4年 15人

効果については半信半疑であったが、実際に実施して見て、直接は聞けない学生の意見が色々と聞け、貴重な資料となった。毎回の講義で、学生がどの程度理解しているかを知ることでも可能であった。分からない講義をすると、「今日の講義は良く分からなかった。」という意見が複数の学生から出て来た。また、恥ずかしい話しではあるが、学生の顔と名前が最後の講義で一致し、名前を呼ぶこと無しに大福帳の返却が出来た。出来れば、学生の顔写真を大福帳に載せることも考えている。夜間主コースの学生については、来年度も続けて行きたい。昼コースの学生についての実施も考慮しているが、対象が160名と膨大なことから、実施に踏み切ったとして、どこまで続くか心配な点がある。

#### 5. 終わりに

表8は、ここで行った卓上実験と仮想実験を含むマルチメディア利用した材料力学教育の試みを、準備段階を含めて比較したものである。マルチメディアは、ともすれば簡単に導入出来るように思われるが、初期投資と準備にかかる費用と時間は、ここで考案した簡易実験に対して高価で長時間である。もし、テレビゲームにひけを取らないような、自由度の高いコンテンツを作るとしたら、少なくとも数千万円以上の費用と数カ月の時間を要することは明白である。さらに、我々が行って来た経験から見ると、材料力学等の実際の機械や構造物を対象にした理

論の学習には、多大な困難が伴う。ムービー等のマルチメディアを用いて、理論を学ばせる座学形式の講義時間の短縮を図り、“理論の説明を主体する講義”と“思考と体験を重視する卓上実験”を、巧みに組み合わせる事により、より良い材料力学の講義や学習システムの構築が出来るのでは無いだろうか。

表 8 卓上実験とバーチャル実験（マルチメディア）との比較

|      | 卓上実験    | バーチャル実験  |
|------|---------|----------|
| 準備時間 | 1 日以内   | 1 月以上    |
| 設備費  | 約 500 円 | 100 万円以上 |
| 材料費  | 100 円   | 0（電気代）   |
| 手軽さ  | 良い      | 普通       |
| 精度   | 悪い      | 良い       |
| 効果   | 良い      | ？        |

#### 参考文献

- (1) 辻 知章、木村 秀和、野田 直剛、日本機械学会論文集（A編）、61(1995)、pp.2514-2519
- (2) 辻 知章、松永 泰弘、福井 一恭、野田 直剛、砂田 文宏、日本機械学会講演論文集（CD-ROM 論文集）、No.97-44 (1997)、p.75
- (3) 大河内 信夫、日本機械学会講演論文集、No.99-4 (1999)、p.3-6
- (4) T. Tsuji, JSSUME '98, 89-7581-073-9 93550 (1998), p.53-56